



# 智能电网

## 基本理念与关键技术

Basic Ideas and Key Technologies  
of the Smart Grid

余贻鑫 等 著



科学出版社

(TM-0980. 01)

# 智能电网

## 基本理念与关键技术

Basic Ideas and Key Technologies  
of the Smart Grid



科学出版社互联网入口  
科学出版社能源与动力分社  
联系电话: 010-64008339  
E-mail: fanyunnian@mail.sciencep.com  
销售分类建议: 能源/电力

[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

ISBN 978-7-03-060955-7



定价: 168.00 元



江苏省高等学校优秀精品教材

“十二五”“十三五”江苏省高等学校重点教材

# 管理会计

理论·模型·案例

(第3版)

Management  
Accounting

主编 温素彬



机械工业出版社  
China Machine Press

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

# 智能电网基本理念与关键技术

Basic Ideas and Key Technologies of the Smart Grid

余贻鑫 等 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

智能电网将像互联网那样改变人们的生活和工作方式,并激励类似的变革。厘清智能电网的基本理念,对于科学有效地实施智能电网至关重要,这是第一篇的主要内容,包括环境压力与能源转型,分布式电源,互联电力系统中高比例风能和太阳能的开发与消纳模式,智能电网原动力的电网视角,智能电网的构想,智能分布式体系和群集理念,智能电网的效益、挑战和研发机遇,以及智能电网架构模型、标准与监管路径等。第二篇重点介绍智能电网的关键技术,包括灵活的配电网络拓扑,集成的能量与通信基础设施,高级量测体系(AMI),大数据和AMI数据分析方法,用户门户与用户能量管理系统,高级配电管理与高级配电自动化,配电快速仿真与建模,态势感知,高级输电运行,多元化储能,电动汽车与绿色建筑等,其主要目的是帮助读者深入理解第一篇的内容。

本书可供电力系统广大工程科技人员、学校师生、政府部门相关人员和公众阅读和参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

智能电网基本理念与关键技术 = Basic Ideas and Key Technologies of the Smart Grid / 余贻鑫等著. —北京: 科学出版社, 2019.5

ISBN 978-7-03-060955-7

I. ①智… II. ①余… III. ①智能控制-电网-基本知识 IV. ①TM76

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第059204号

责任编辑: 范运年 王楠楠 / 责任校对: 彭 涛

责任印制: 师艳茹 / 封面设计: 蓝正设计

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

河北鹏润印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2019年5月第一版 开本: 720×1000 1/16

2019年5月第一次印刷 印张: 21 1/4 插页: 2

字数: 420 000

定价: 168.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

# 前 言

厘清智能电网的基本理念对于科学有效地实施智能电网至关重要，第一篇把它作为基本任务详加阐述。第二篇介绍智能电网的关键技术，旨在帮助读者深入理解第一篇的内容。这是因为，在技术飞速发展的今天，理念可持续的时间相对长得多。本书的前言部分将概括作者到目前为止对智能电网基本理念的理解。

## 建设美丽中国需要高比例可再生的风能和太阳能发电

生态文明和社会可持续发展要求人类社会关注并实施清洁替代和电能替代，以应对气候变化和环境保护的需要，有效缓解化石能源资源紧缺和能源需求日益增长的矛盾。未来的能源构成将由现在的以化石能源为主、可再生能源为辅转变为以可再生能源为主、化石能源为辅，即未来必然发展高比例可再生能源发电。在 2050 年建成青山绿水的美丽中国的构想中，可再生能源需要占总能源的 65% 以上，而其中风能和太阳能需要占总能源的 47% 以上。我国现有的风能和太阳能资源完全可以满足这一高比例可再生能源发电的发展要求——无论西部地区还是东部地区。但是风力发电和太阳能光伏发电与传统的化石能源发电全然不同，它们是间歇的、多变的和不确定的，不能单独运行，需要采用功率补偿或平滑措施，其中包括公共电网的吸纳、需求响应、分布式储能和小型燃油燃气发电等。为此需要一个功能合理的现代电网来集成高比例的太阳能和风能，并提高能源脱碳、转化与利用过程的效率。调峰能力是制约我国电力系统接纳高比例可再生能源发电的最根本因素，能源领域正在积极探索可用于配合可再生能源发电的调峰措施，可归纳为以下几大类：灵活电源、需求响应、与其他区域的电力交换、储能、综合能源系统等，其中灵活电源是重中之重。

可再生能源应用的主流形式是分布式的，它在配电和发电领域中的影响具有颠覆性

对于可再生能源的应用，采用在负荷中心地区广泛地发展分布式的风能和太阳能光伏发电系统的就地开发与消纳模式，还是采用在远离负荷中心地区建设大规模的风电和光伏基地并将其电能外送到负荷中心的远距离输送模式，会直接影响高比例可再生能源愿景的顺利实现。较为一致的观点是“解决风能和太阳能发电不确定性问题的最好方式是就地(终端)开发与消纳”。20 世纪 20~50 年代提出并延续至今的互联电力系统(interconnected power system)具有互联、开放、对等(能量自治单元之间的对等互联)和共享(以分散式的局部最优实现全局能量管理

的调度优化)的特性,这些特性与后来提出的互联网的基本特性是一致的。从互联电力系统的规范出发,考虑可再生能源电量比例、系统运行约束和可用调节容量,对风能和太阳能光伏发电的应用模式所进行的分析表明,在以燃煤火电为主要调节容量(我国现时如此)的情况下,只有采用就地开发与消纳模式才能实现集成高比例的风能和太阳能光伏发电的目标。在该模式下,通过采取多种改善措施,风电和光伏发电的比例可以达到60%以上。同时从全社会成本(包括系统投资成本、燃料成本、环境成本、辅助服务成本、可靠性成本和网损成本)角度看,即使在可再生能源品质较差的区域,就地开发与消纳模式下的单位可再生能源供电成本已经明显低于大规模远距离输送模式下的单位可再生能源供电成本,而且随着可靠性价值的提升和太阳能与风能发电成本的下降,这一趋势会日益明显。目前国际上正在密切关注在哪个时间点太阳能光伏组件加电池储能系统能达到与电网平价(grid parity)。

分布式电源(DER)涵盖与配电系统相互连接的发电和/或电能存储系统,包括安装在用户端“电表后面”的设备。分布式电源采用广泛的发电和存储技术,如可再生能源、热电联产(CHP)、固定电池储能和带有双向转换器的电动汽车等。分布式电源可用于本地发电/存储,可以参与容量调节和辅助服务市场,也可以汇集成虚拟发电厂。由智能逆变器等互连设备实现的可与电网互动的高级分布式电源功能正在越来越多地被用来确保电能质量和电网稳定性,同时满足配电系统的安全要求。高级分布式电源功能还能够实现新的电网架构,其中包含“微网”——当电力中断时,可以与电网分离,并可与电网合作运行以形成更具适应性的韧性(resilience)电力系统。

除了分布式的发电和储能,鼓励用户参与需求响应(DR)和基于协议的负荷控制也是实现电力供需平衡的有效方法。需求响应的定义是:在正常耗电模式下,用户用电功率能够随着电价的变化而变化,或者当电力零售市场电价过高或系统可靠性受到损害时,能够促使用户减少用电。生态文明意识的提升,使电力公司积极寻求不同于传统的方式来满足供需平衡。居民负荷、商业负荷和高耗能产业中均含有较大比例的可平移负荷,它们可以与电网友好合作,支持削峰填谷与事故情况下的减负荷,帮助系统实现近乎瞬时的功率平衡。

现代交通在能源消费结构中占比很高,仅次于电力,对其实现电能替代和电能高效利用,可以有效缓解化石能源资源紧缺的局面。到2050年实现美丽中国的目标要求电动汽车比例达到80%以上,其电能的总消费量和总存储量都十分巨大,其可在用电低谷(电价便宜)时充电,并在白天最需要电(电价贵)的时候将电输回电网,所以电动汽车也将成为需求响应的重要部分,应该且可以与大规模发展的分布式可再生能源发电协同发展。

供电侧与需求侧的不确定性共同构成了未来电网运行所面临的巨大挑战。大

量分布式可再生能源和用户侧能量管理系统的接入加剧了电力系统终端(如配电网、微网、工厂、建筑和家庭)的供需不确定性。解决该问题的关键在于实现不确定性的就地(终端)解决,未来电网必须将责任分摊到终端。

大量的分布式电源接入电网后,由于其多直接接入各级配电网(尤其是 110kV 及其以下电压等级的配电网),配电网自上而下都成了线路潮流可能双向流动的电力交换系统。然而,现时的配电网是按单向潮流设计的,不具备有效集成大量分布式电源的技术潜能,即现有电网难以接纳高比例的分布式可再生能源。因此,“如何处理数以百万计的广泛分布的分布式电源和应对可再生风能和太阳能发电的间歇性、多变性和不确定性,同时确保电网的安全性、可靠性和人身与设备安全,并激励市场”就成了未来电网需要解决的问题。这一任务将由智能电网来完成。

从电网的角度看,智能电网的原动力至少包含下述四个方面:提高系统(以抵御事故扰动为目的)的安全稳定运行水平,降低大规模停电的风险和增强灾难性事件后快速恢复供电的能力;分布式电源的大量接入和充分利用;高级市场化和需求侧管理;数字化社会对电网的供电可靠性、电能质量和能源效率(EE)的高要求。

“分布式电源+智能电网”更加关注本地控制和减少对外依赖,是“颠覆性”的改变,其对日常生活、社会 and 经济发展存在潜在的巨大影响。

### 智能电网的本质特征和总体设想

智能电网最本质的特点是,电力和信息的双向流动性,并可由此建立起一个高度自动化和广泛分布的能量交换网络;把分布式计算和通信的优势引入电网,达到信息实时交换和设备层次上近乎瞬时的供需平衡。

智能电网的总体设想是智能化、高效、包容、激励、机遇、重视质量、抗灾能力(韧性)强和环保等,而不是单纯的智能化。

智能电网将加强电力交换系统的方方面面,包括发电、输电、配电和消费等。

(1) 提供大范围的态势感知,有助于缓解电网的阻塞和瓶颈,缩小乃至防止大停电。

(2) 为电网运行人员提供更好“颗粒度”的系统可观性,使他们能够优化潮流控制和资产管理,并使电网具有事故后快速恢复的能力,即自愈能力。

(3) 集成和使用大量分布式发电,特别是可再生能源发电。

(4) 使电力公司通过双向的可见性,倡导、鼓励和支持消费者参与电力市场和需求响应,支持不断增长的电动汽车的使用。

(5) 为消费者提供机会,使他们能以前所未有的热情积极参与能源消费选择。

### (6) 解决赛博<sup>①</sup>(网络)安全问题。

微处理器大规模应用之前创建的集中规划和控制的电力基础设施在很大程度上限制了电网的灵活性,失去了效率,致使电网在安全性、可靠性和韧性等几个关键方面承担着风险。由于未来电网将接入数量巨大的分布式电源,并且其出力难以精确预测,传统的集中控制模式更加难以适用。所以,智能电网,特别是智能配电网,将是分布式智能的基础设施。配电网络的拓扑应该是灵活的、可重构的;进而,电所及之处均有可靠的双向通信,从底层的传感器和智能代理开始,能源网和信息通信网将高度融合。

高级量测体系(AMI)完善了电力通信的最后一公里,为电力公司提供了前所未有的系统范围的量测和可观性,其实施能够帮助电力公司获取史无前例的超大数量的数据。这些数据除电费计量外还可用于评估设备运行状况、优化资产利用、延长设备寿命、优化运维费用、改进电网规划、识别电能质量问题、探测及减少窃电行为等众多方面。使用柔性交直流输电装置和智能电力电子装置的高级配电自动化(ADA)将创造未来的智能配电网。ADA是革命,而不只是传统配电自动化的扩展。在全球范围内的智能电网实施方案中,AMI和ADA是公认的重要的基础性功能模块。

一个称作“智能”的电网,在配电网中使用的信息技术会和输电网运行时使用的信息技术一样多。实质上,任何智能电网的命脉都是用来驱动应用的数据和信息,而这些应用又反过来促使开发新的和改进的运营策略成为可能。电力系统任一领域,包括电力用户、电力市场、服务提供商、运行、发电、输电和配电,所收集到的数据都可能与其他领域的改善相关。所以以适时的方式与那些需要使用或有权了解数据的参与者实时共享数据,是智能电网的基本要素。

设想中的智能电网(smart grid)将像互联网那样改变人们的生活和工作方式,并激励类似的变革。但是由于智能电网本身的复杂性,其涉及广泛的利益相关者,需要漫长的过渡、持续的研发和多种技术的长期共存。短期内可以着眼于实现一个较为智能的电网(smarter grid),利用已有的或即将配置的技术使目前的电网更有效,在提供优质电力的同时,还可以创造较大的社会效益(如改善环境)。

智能电网的相关技术可以分为3类,即智能电网技术、智能电网可带动的技术和为智能电网创建平台的技术,内容非常广泛。智能电网将应用工业界最好的技术和理念以加速其实现,如开放式的体系结构、互联网协议、即插即用技术、共同的技术标准、非专用化和互操作性等。事实上,有些技术已经在电网中得到

---

<sup>①</sup> Cyber在本书中译为“赛博”,如“Cyber Security”,译为“赛博安全”,而未译为“网络安全”。这样在谈论智能电网时,遇到“Cyber Security of power network”,就可翻译为“电力网络的赛博安全”,而不是“电力网络的网络安全”。本书也不把cyber译为“信息”,这是为了防止混淆“Cyber Security”和“Information Security”这两个密切联系又存在区别的概念。

应用，但只有在体现智能电网的双向数字通信能力和即插即用能力的时候，其潜能才会充分“喷发”出来。

为了激励智能电网方面的创新，亟须建立一个成熟的、健康的和集成的电力市场，其中包括：实施分时或实时电价，使电能作为商品的市场价值得到合理的体现；制定鼓励分布式电源卖电回电网的政策，如分布式清洁能源的上网电价政策等；制定保证智能电网投资成本回收的政策等。

### 群集理念和智能分布式体系

小概率事件所造成的损失可能非常巨大，单纯的  $N-1$  和  $N-2$  安全性校验<sup>①</sup>是不足的，人们需要改变思考系统问题时一些传统的观念。智能电网会成为更鲁棒的自治和自适应的基础设施，能够对恐怖袭击、军事威胁、元件故障、自然灾害等扰动做出自愈的响应，从而大大提高电网的安全性、韧性和供电可靠性。从这个角度看，与公共电网无缝连接的智能微网是完美的。大量技术的、成本的和社会的因素正汇集在一起，使得微网几乎必然会成为电力基础设施中最大的变革。微网可以看作电力公司对互联用户作用的扩展，在此互联的过程中存在创造很不同的未来配电系统的机会。

Rifkin 所提倡的能源互联网构想是，让数以百万计的用户在家庭、办公室或者工厂自行利用可再生能源发电，并能够彼此共享所发出的电能；电动汽车与本地储能设备将会得到广泛的应用。互联网技术的加入将把电网转变为一种能源可以互相共享的互联网。

为了抓住未来的机遇，已有学者提出如下的设想：未来的配电网、微网、建筑单元(大楼、工厂和住宅等)与输电系统的差异将逐步消失，将具有本地发电和双向电力潮流的特点，都将配有能量管理系统(EMS)，并按照“群集”理念实现各自近实时的功率平衡，即输电系统(互联电力系统)是若干个控制区(区域性输电网)互联起来的群集(clusters)，每个控制区是一个群(cluster)；一个区域输电网群包含许多配电网群集。每个配电网群又包含许多微网、工厂和家庭群集。一个微网群可能包含多个智慧家庭群集。每个群集的运行过程中，通过调度确定各群间的功率交换计划，每一个“群”必须维持其内部净功率的平衡并履行与外部功率交换的职责，以维持整个群集近实时的功率平衡。和控制区相似，每个群都有：  
①发电和/或负荷；②智能控制和通信。群的基本功能也包括如下三个方面：①进行发电/负荷调度(dispatch)，以维持净功率平衡；②当地的反馈控制，用于平滑波动；③通过削减发电/负荷来缓解故障。

第三次工业革命期望建立的能源互联网(智能电网)中，可再生能源的分布式特性(集成高比例分布式可再生能源)需要的是协作，而不是集中或分级的命令和

<sup>①</sup>  $N-x$  安全性校验是指系统中任意  $x$  个元件同时发生故障情况下的安全性校验。

控制机制。协作行为将导致所产生的利益被更加分散地共享。通力合作、追求共同利益是实现经济可持续发展的最佳途径。群集共同工作可以确保最大化和最高效地利用可再生能源。追求共同利益是经济可持续发展的最佳路径。

### 智能电网的效益、挑战和研发机遇

实施智能电网发展战略不仅使用户能够获得高安全性、高可靠性、高质量、高效率 and 价格合理的电力供应，还能提高国家的能源安全水平，改善环境，推动可持续发展，同时激励市场不断创新，从而提高国家的国际经济竞争力。实施智能电网的关键目的是利用各种技术、资源和市场机制以提高社会效益。智能电网的预期效益是明显的，这些效益包括：供电的安全性、韧性、可靠性和电能质量提高方面的收益；电力设备、人身和赛博安全方面的收益；能源使用效率收益；环境保护和可持续发展的收益以及直接经济（容量、燃料和运维成本）效益。而从广义层面来看，由于技术涉猎广泛，智能电网的一个关键目标是催生新的技术和商业模式，实现产业革命，以确保子孙后代繁荣昌盛。网络领袖思科预言，智能电网拥有比互联网大得多的市场空间。

智能电网是不断发展的，需要进行持续的研究以预测不断变化的需求，评估相应的收益和成本。在实施智能电网时，需要时刻考虑所做的工作是否适用于市场？是否可激励用户参与？是否可实现资产优化？是否能够获得高效运行？电力公司和监管机构应该持续地向消费者证明：智能电网的效益最终会超过其投入的成本。因此，在智能电网实施中，必须坚持“创新驱动发展”的战略，需要获得大量的知识产权，降低成本并提高效率。

智能电网面临的挑战是极其广泛的，涉及许多技术、体制和社会问题，电网变迁的过程必将改变整个行业的业务模型。智能电网不仅涉及广泛的利益相关者，而且其组织、研发和实施均很复杂，需要人们转变传统的电网理念。智能电网发展的各个阶段，从基础科学和工程技术的研究到开发、示范和运行都会出现障碍。指出其中关键性的障碍，可以帮助明确如何才能最大限度地发挥其潜能，从而尽可能地为国家提供广泛的社会和经济效益。当然，与这些挑战并存的是前所未有的研发机遇。

互操作性和赛博安全标准是实现智能电网效益以及管理整体成本的关键要素——支持标准的基础设施才能实现效益。标准的缺乏，将使各种智能电网技术在应用中缺乏安全保障，令其投资存在风险，并可能阻碍其广阔的应用及未来的技术创新，并且难以形成竞争的市场环境。

智能电网的实施需要强化监管。监管路径是从能源政策的一般目标三角形开始的，该三角形所显示的是能源供应系统变革的三种重要原动力，这些原动力是智能电网发展的主要影响因素，可据此设计实施智能电网的路线图。为了实现这

些计划,需要在政府主导下,定义智能电网的角色和责任,定义未来的能源(包括可再生能源)供应和智能电网的长期发展目标,开放市场和明确信息共享。

最后要说的是,能源转型规模十分巨大,需要很长的时间,往往会持续几十年。智能电网的实施将支持和伴随整个能源转型的过程。

本书是在余贻鑫院士主持下大家共同努力的结果。其中,余贻鑫院士主笔了第一篇和第二篇第1章、第6章和第7章,秦超副教授全面协助;杨挺教授和刘艳丽副教授联合撰写了第二篇第2章,栾文鹏教授撰写了第二篇第3章,秦超副教授撰写了第二篇第4章,刘艳丽副教授和周越博士联合撰写了第二篇第5章,刘艳丽副教授撰写了第二篇第8章,曾沅副教授撰写了第二篇第9~第11章,孙冰博士参与了第一篇的第1章和第3章的部分工作,并为本书提供了算例和附录B。刘艳丽副教授和秦超副教授负责了全书图形加工的组织工作。此外,课题组的马世乾和杨添凯也为本书做出了贡献。

本书期望为读者提供一本关于智能电网基本理念和关键技术的、较为严谨而又简明扼要的书籍。但鉴于作者学识所限,并且随着智能电网的发展,其理念和技术都在不断升华,所以不足之处在所难免,希望能够得到广大读者的指正。

作 者

2018年8月5日

# 目 录

## 前言

### 第一篇 智能电网的基本理念

第 1 章 智能电网的原动力——环境压力与能源转型	3
1.1 气候和环境问题——应对气候变化和环境保护刻不容缓	3
1.2 可再生能源发电	6
1.3 能源转型的步伐和在中国的紧迫性	13
参考文献	16
第 2 章 分布式电源	17
2.1 何谓 DER	17
2.2 DER 对电网的意义和挑战	19
2.3 电网中的可用调节容量	26
参考文献	31
第 3 章 互联电力系统中高比例风能和太阳能的开发与消纳模式	32
3.1 互联电力系统理念	33
3.2 W&PVP 的两种开发与消纳模式	35
参考文献	49
第 4 章 智能电网原动力的电网视角	50
4.1 电力系统电气行为简述	50
4.2 提高电网的安全稳定性和韧性	51
4.3 电力市场化和需求侧管理	52
4.4 电网的各种约束(提高可靠性、提高电能质量、节能降损和环保) 日益严格	55
4.5 电网的第二次智能化	59
参考文献	63
第 5 章 智能电网的构想	64
5.1 智能电网的总体设想	64
5.2 智能电网的主要运行技术组成	65
5.3 智能电网组成要素的分层描述	70

5.4 与智能电网相关的技术	72
参考文献	75
<b>第 6 章 智能分布式体系和群集理念</b>	<b>76</b>
6.1 智能配电网的智能分布式体系结构	76
6.2 微网	77
6.3 智能电网群集的理念	84
6.4 能源互联网与智能电网	88
参考文献	90
<b>第 7 章 智能电网的效益、挑战和研发机遇</b>	<b>91</b>
7.1 智能电网预期的效益	91
7.2 智能电网的成本效益分析举例	94
7.3 智能电网的评价指标	95
7.4 实现智能电网所面临的挑战	97
7.5 智能配电网的研发机遇	101
参考文献	102
<b>第 8 章 NIST 定义的智能电网模型</b>	<b>103</b>
8.1 智能电网的概念模型	103
8.2 从智能电网概念模型向智能电网结构模型的转换	108
8.3 映射到智能电网概念模型的传统系统的逻辑模型	110
参考文献	112
<b>第 9 章 智能电网的标准与监管路径</b>	<b>113</b>
9.1 智能电网标准	113
9.2 能源政策三角形和智能电网监管路径	116
参考文献	121

## 第二篇 智能电网的关键技术

<b>第 1 章 灵活的配电网拓扑</b>	<b>125</b>
1.1 配电系统简介	125
1.2 中压配电网结构的概念性设计	128
1.3 未来的配电网拓扑及所包含的重要技术	134
1.4 微网的关键技术和重要研发领域	138
参考文献	140
<b>第 2 章 集成的能量与通信基础设施</b>	<b>141</b>
2.1 智能电网是典型赛博物理系统	141

2.2	智能电网集成的能量与通信基础设施框架	142
2.3	智能电网通信技术	144
2.4	智能电网通信网络组网方式	153
2.5	智能电网赛博安全	155
2.6	IPv6 及其应用需求	162
	参考文献	166
<b>第 3 章</b>	<b>支持多种服务和业务融合的高级量测体系</b>	<b>167</b>
3.1	AMI 的基本构想	167
3.2	AMI 的实施现状和技术发展趋势	174
3.3	支持多种服务和业务融合的 AMI 架构	176
3.4	基于开放标准的 AMI 实施的主要意义	180
	参考文献	182
<b>第 4 章</b>	<b>智能电网中的大数据和 AMI 数据分析方法</b>	<b>183</b>
4.1	电力公司的数据源和特点	183
4.2	电力大数据价值的多维视角	185
4.3	数据分析方法	188
4.4	AMI 数据分析元实例	192
	参考文献	195
<b>第 5 章</b>	<b>用户门户与用户能量管理系统</b>	<b>196</b>
5.1	智能用电	196
5.2	用户门户	200
5.3	用户能量管理系统	202
5.4	用户离网光储系统优化规划示例	208
	参考文献	214
<b>第 6 章</b>	<b>高级配电管理与高级配电自动化</b>	<b>215</b>
6.1	高级配电管理	216
6.2	高级配电自动化	217
6.3	动态微网	222
6.4	主动配电网孤岛划分	224
	参考文献	231
<b>第 7 章</b>	<b>配电快速仿真与建模</b>	<b>232</b>
7.1	DFSM 的基本构想	232
7.2	DFSM 的基本功能	233
7.3	DFSM 中的仿真工具与建模工具	234

7.4	DFSM 工具的高层次需求框架	237
7.5	网络重构的数学描述	238
7.6	电压与无功控制的数学描述	240
	参考文献	242
<b>第 8 章</b>	<b>态势感知</b>	<b>243</b>
8.1	态势感知驱动力与基本理念	243
8.2	增强态势感知核心功能与关键技术	244
8.3	传感器和无线传感网	246
8.4	态势可视化	247
8.5	安全域方法	250
	参考文献	258
<b>第 9 章</b>	<b>高级输电运行</b>	<b>259</b>
9.1	ATO 的基本构想	259
9.2	输电系统的运行控制	260
9.3	ATO 的技术保障与发展趋势	269
	参考文献	273
<b>第 10 章</b>	<b>支撑电网高效运行的多元化储能</b>	<b>274</b>
10.1	储能技术的发展和现状	274
10.2	基于多元储能的电网高效运行	278
	参考文献	285
<b>第 11 章</b>	<b>智能电网的产业推动——电动汽车与绿色建筑</b>	<b>286</b>
11.1	电动汽车的发展需求与电网支持	286
11.2	绿色建筑的发展需求与电网支持	292
	参考文献	295
<b>附录 A</b>	<b>名词解释</b>	<b>297</b>
<b>附录 B</b>	<b>电力系统评估的推荐参数</b>	<b>307</b>
<b>附录 C</b>	<b>智能电网指标简介</b>	<b>310</b>
	<b>彩插</b>	

# 第一篇 智能电网的基本理念